http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2014.0799

基于数据网格化方法的低轨辐射带建模技术

常峥[1,2]，王咏梅*[1]，田天[3]，张贤国[1]

(1. 中国科学院 国家空间科学中心，北京 100190； 2. 中国科学院大学 地球科学学院，北京 100049；
3. 61741 部队，北京 100094)

摘 要：地球辐射带中的高能带电粒子是引起航天器材料和器件性能退化甚至失效的主要空间环境因素. 因此，航天器设计中所采用的辐射带模型的准确程度对于航天器的生存能力和航天任务的完成质量至关重要. 在利用我国自主辐射带高能粒子探测数据进行的辐射带建模中，探测数据的空间网格化是一项非常重要的工作. 介绍了我国辐射带探测数据的情况，以及辐射带建模的方法和步骤；重点研究了不同插值方法在低地球轨道(LEO)空间辐射带建模数据网格化中的应用，并开展了误差分析. 研究结果表明：在各种常用的插值方法中，反距离加权法、自然邻点法和最近邻点法适合工程化应用. 其中，反距离加权法生成的数据网格对粒子通量的反演结果精度最高，该方法采用低阶距离时得到的反演结果更为合理.

关 键 词：空间环境；辐射带；数据网格；插值；反距离加权法；自然邻点法；最近邻点法

中图分类号：V221⁺.3；TB553

文献标识码：A 文章编号：1001-5965(2015)12-2288-08

地球外层空间存在着一个区域，其中充满地磁场捕获的高能质子和电子，这个区域被称为地球辐射带(以下简称为辐射带)[1]. 辐射带中的质子和电子能量较高[2]，能够引起航天器材料和器件性能退化甚至失效[3-4]. 在地球空间运行的绝大多数航天器都要或多或少地穿越辐射带，遭遇高能粒子辐射. 因此，在航天任务的设计过程中，准确地定量估算航天器所处的空间辐射环境对于航天器设计的优化、运行安全的保障和任务的完成都至关重要.

目前国际和国内航天界普遍采用 NASA 编制的质子模型 AP8 和电子模型 AE8 来计算辐射带质子和电子的通量，并以此为基础评估辐射带对航天器的影响[3,5-6]. 目前我国可获得的 AP8/AE8 模型的最新版本分别完成于 1976 年和 1983 年，这两个版本使用的都是 20 世纪 70 年代以前的数据[7-8]，观测资料比较陈旧，模型计算值与实际观测值经常存在较大偏差[4,6,9-12]，使得这两个版本的模型应用到当前航天任务中存在时效局限性. NASA 在后期对 AP8/AE8 模型进行了多次修订和补充，形成了多种修正版本，并且于 2006 年联合美国多家单位开始开发用于替代 AP8/AE8 的辐射带质子和电子的新模型：AP9/AE9[6]，但由于技术封锁，我国目前还无法获得 AP8/AE8 的修正版本和 AP9/AE9. 因此，我国自主研发辐射带模型对于我国航天工程的可持续发展具有现实和战略的意义. 地面高度为 300 ~ 1 000 km 的轨道空间即低地球轨道(Low-Earth Orbit，LEO)空间是大量应用卫星运行的区域[13]. 因此，这一区域是辐射带建模中最重要的区域之一.

收稿日期：2014-12-17；录用日期：2015-01-05；网络出版时间：2015-03-18 14:07
网络出版地址：www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20150318.1407.001.html
基金项目：国家自然科学基金青年科学基金(41404149)
作者简介：常峥(1979—)，男，北京人，博士研究生，changzh@nssc.ac.cn
* 通讯作者：王咏梅(1967—)，女，贵州纳雍人，研究员，wym@nssc.ac.cn，研究方向为高层大气、电离层光学遥感仪器研制和数据应用.

引用格式：常峥，王咏梅，田天，等. 基于数据网格化方法的低轨辐射带建模技术[J]. 北京航空航天大学学报，2015，41(12)：2288-2295. Chang Z，Wang Y M，Tian T，et al. Modeling technology of radiation belt in LEO based on data gridding methods[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2015，41(12)：2288-2295 (in Chinese).

1　我国辐射带监测数据情况

我国从 20 世纪 80 年代开始对空间环境展开了大规模探测，其中 LEO 空间辐射带高能粒子分布是探测的重点[14]. 截至到目前为止，已发射卫星中搭载有高能粒子探测器的卫星共有 50 余颗，其中 LEO 卫星超过 30 颗. 部分高能粒子探测仪器的卫星轨道、观测对象、能量范围、通道数和观测时段如表 1 所示. 这些仪器的设计原理相同，都为半导体型探测器.

不同仪器获得的探测数据在联合使用前，必须经过交叉定标[15]. 因此在建模过程中，研究人员对表 1 所列数据进行了同化处理，并以此为基础建立了 LEO、中地球轨道(Medium-Earth Orbit，MEO)和同步轨道(Geosynchronous Orbit，GEO)辐射环境数据库，数据库包含了超过一个完整太阳活动周(11 a)的 LEO 空间辐射带数据，可以用于 LEO 空间辐射带建模.

表 1　高能粒子探测仪器参数

Table 1　High energy charged particle detector parameters

卫星名称	轨道	观测对象	能量范围/MeV	通道数	观测时段
神舟四号、神舟五号	近圆轨道，高度 340 km，倾角 42°	质子能谱 电子能谱	2.9 ~ 300 0.2 ~ 5.0	10 9	2002-12—2004-05
天宫一号	近圆轨道，高度 380 km，倾角 43°	质子能谱 电子能谱	>1.5 >0.2	8 8	2011-10 至今
风云三号 A 星、B 星、C 星	近圆轨道，高度 830 km，倾角 98°	质子能谱 电子能谱	3 ~ 300 0.15 ~ 5.7	6 5	2008-05 至今
风云一号 C 星、D 星	近圆轨道，高度 860 km，倾角 98°	质子能谱 电子通量	2.9 ~ 300 >1.6	5 1	1995-05—2010-06
实践五号	近圆轨道，高度 860 km，倾角 98°	质子能谱 电子能谱	2.9 ~ 300 0.15 ~ 5.7	5 5	1999-05—2000-02
实践四号	大椭圆轨道，近地点 200 km，远地点 36 000 km，倾角 28.5°	质子能谱 电子能谱	4 ~ 300 0.5 ~ 4	 5	1994-02—1994-08
风云二号 A 星、B 星	静止轨道	质子能谱 质子通量 电子通量	2.9 ~ 300 >1.1 >1.4	3 1 1	1997-06—1998-04 2000-06—2001-02
风云二号 C 星、D 星、E 星	静止轨道	质子能谱 电子通量	10 ~ 300 >0.35 >2	3 2	2004-10 至今
风云二号 F 星	静止轨道	质子能谱 电子能谱	>4 >0.2	6 11	2012-01 至今

2　辐射带建模的方法

本文利用我国辐射带高能粒子的探测数据建立的自主辐射带模型和 NASA 的 AP8/AE8 均为经验模型，即模型的基础是具有特定组织结构的数据，文中将这种具有特定组织结构的数据定义为表单. 在辐射带模型中，表单指的是能描述辐射环境某一给定时刻、给定空间环境状态下在所有空间维度上分布特征的粒子通量数据列表. AP8/AE8仅含有一组代表太阳活动高年和低年时对应高能粒子通量平均分布的表单，不能给出辐射带随地磁场长期变化而引起的缓变，也不能反映太阳活动周内的各种周期性变化和各种突发性扰动变化[16]，因此称其为静态模型; 代替它的 AP9/AE9 只能通过输出结果中的概率间接地反映各种变化对辐射带的影响[17]，说明 AP9/AE9 也不是真正意义上的动态模型.

本文试图建立的自主辐射带模型的建模主要步骤如图 1 所示. 从图 1 中可以看出，模型输出结果是通过对模型数据中的 4 组表单进行查询、计算并将结果进行叠加后得到的，因此这 4 组表单是模型的核心内容. 这 4 组表单分别给出辐射带的宁静状态、长期缓变状态、周期变化状态和扰动变化状态，因此自主辐射带模型属于动态模型，这也是该模型相比于 AP8/AE8 的最大改进之处. 表单的建立流程如图 2 所示. 同化后的数据在空间中离散分布，必须先经过空间网格化处理，使数据

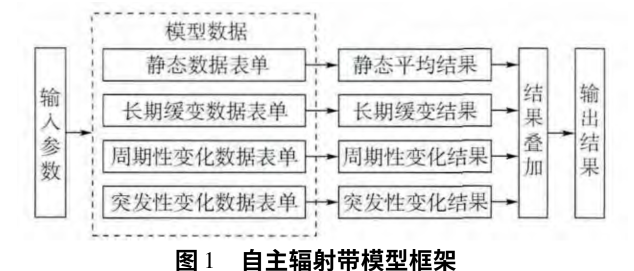


图 1　自主辐射带模型框架

Fig. 1　Framework of own radiation belts model

在空间中均匀分布后，再进行分类处理，生成各类数据库. 因此，空间网格化是建模中的重要步骤.

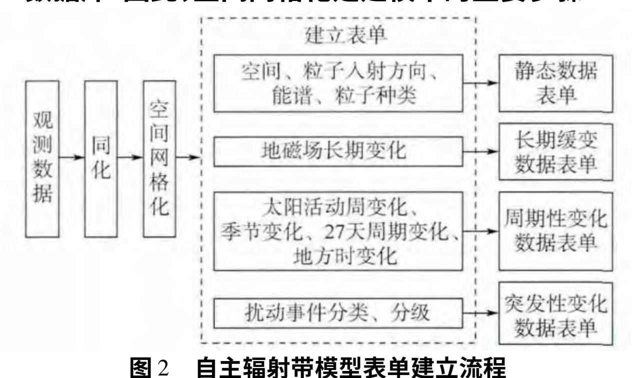


图2 自主辐射带模型表单建立流程

Fig. 2 Procedure of creating data table in own radiation belts model

3种轨道空间中，LEO空间卫星最多，且LEO空间包含了多个不同高度的轨道，而MEO（特指高度为22 000 km、倾角为55°的卫星轨道）空间和GEO空间均仅包含单一轨道的若干颗卫星. 因此，LEO空间的数据网格化成为建模中的重点.

3 LEO空间数据网格化

3.1 空间数据网格

鉴于LEO空间观测数据的分布特点，为了得到如图3所示的空间数据网格，本文采取了以下处理方法进行数据网格化：

1）利用11个轨道高度上的卫星观测资料，完成对应11个空间球面上的数据网格化. 对于同系列卫星观测数据的使用原则是，利用其中部分卫星的观测资料完成插值，剩余卫星的观测资料用于对插值结果进行验证.

2）11个空间球面以外的空间，利用11个空间球面的数据网格，结合大椭圆轨道卫星的观测资料通过插值获得；11个空间球面之间的区域采用内插，高度范围为300～340 km、860～1 000 km的区域采用外插.

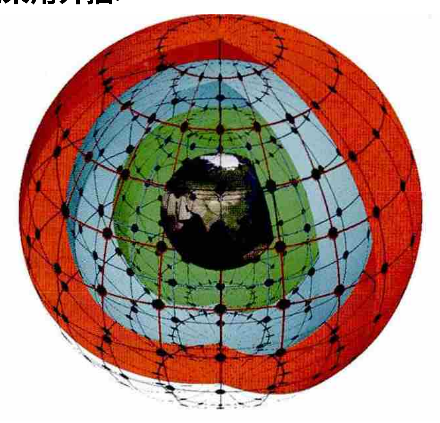


图3 LEO空间数据网格

Fig. 3 Data grid of LEO space

3.2 可选用的插值方法

空间网格点上的粒子通量大小是通过对观测数据插值获得的，而插值中最关键的步骤是利用同一空间球面上观测数据进行插值得到该球面上的网格点通量. 常用的插值方法包括反距离加权法（Inverse Distance Weighting，IDW）[18]、克里格法（Kriging）[19]、自然邻点法（natural neighbor）[20]、最近邻点法（nearest neighbor）[21]、多元回归法（polynomial regression）[22]、最小曲率法（minimum curvature）[23-24]、C1连续5次双变量插值法（quintic）[25-26]、改进谢别德法（modified Shepard's）[27-29]径向基函数法（Radial Basis Function，RBF）[30-31]、三角形剖分法（triangulation）[32-34]等. 这些方法在基本原理、数学模型、计算效率等方面各不相同，但在使用中一般都需要输入辅助参数，例如：克里格法需要输入所采用的变异函数的类型、变程、块金值、基台值[35]；改进谢别德法需要输入节函数的两个影响半径[36]；径向基函数法需要确定插值使用的径向基函数[37].

在应用插值方法时，由于网格点和观测数据分布在球面上，因此插值形式应为球面插值；同时由于辐射带内的粒子通量分布服从幂律谱[38]，因此计算中应采用对数插值.

使用空间球面上的网格点通量可以反演出该球面上任意位置的通量. 通过对反演结果的误差分析可以确定网格点通量的精度，进而确定选取的插值方法是否合适. 对反演结果的误差分析主要是对反演值（P）和观测值（O）之差（$D=P-Q$）进行分析. 误差分析包括两部分：计算各类误差成分在总误差中的比例和计算误差大小[39]. 本文采用均方误差（Mean Square Error，MSE）来描述误差比例. MSE包括系统均方误差（systematic MSE）MSE_s和非系统均方误差（unsystematic MSE）MSE_u，其中MSE_s由3部分组成，包括MSE中的偏移成分（additive MSE）MSE_a、缩放成分（proportional MSE）MSE_p和MSE_a、MSE_p互相依赖成分（interdependence MSE）MSE_i. 以上误差的计算方法由式（1）～式（6）给出：

$$\mathrm{MSE}=\frac{\sum_{i=1}^{N}(P_i-O_i)^2}{N} \tag{1}$$

$$\mathrm{MSE_a}=a^2 \tag{2}$$

$$\mathrm{MSE_p}=(b-1)^2\frac{\sum_{i=1}^{N}O_i^2}{N} \tag{3}$$

$$\mathrm{MSE_i}=2a(b-1)\bar{O} \tag{4}$$

$$\mathrm{MSE_s}=\mathrm{MSE_a}+\mathrm{MSE_p}+\mathrm{MSE_i} \tag{5}$$

$$\mathrm{MSE_u} = \mathrm{MSE} - \mathrm{MSE_s} \tag{6}$$

式中：N 为观测点数；P_i 和 O_i 分别为第 i 点的计算值和观测值；$\bar{O}$ 为观测值的平均值；a 和 b 分别为以 O 为自变量、以 P 为因变量采用最小二乘法拟合出的直线的截距和斜率.

本文采用 RMSE、$\mathrm{RMSE_s}$、$\mathrm{RMSE_u}$、$\mathrm{RMSE_a}$、$\mathrm{RMSE_p}$、$\mathrm{RMSE_i}$ 来描述误差大小，这 6 个参数值的量纲与粒子通量相同，大小分别等于 MSE、$\mathrm{MSE_s}$、$\mathrm{MSE_u}$、$\mathrm{MSE_a}$、$\mathrm{MSE_p}$、$\mathrm{MSE_i}$ 的平方根，符号与 MSE、$\mathrm{MSE_s}$、$\mathrm{MSE_u}$、$\mathrm{MSE_a}$、$\mathrm{MSE_p}$、$\mathrm{MSE_i}$ 相同. 同时，还采用了一致性系数 d 来描述 P 和 O 的一致程度，d 的计算方法为

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(|P_i'| + |O_i'|)^2} \tag{7}$$

式中：P_i' 和 O_i' 分别由式(8)和式(9)给出：

$$P_i' = P_i - \bar{O} \tag{8}$$

$$O_i' = O_i - \bar{O} \tag{9}$$

d 的取值范围在 0.0～1.0 之间，d 越接近1.0 表示计算值和观测值的一致性越高.

3.3　插值方法的应用

本文通过对轨道高度为 630 km 的两颗卫星的观测数据的处理来说明空间球面上的数据网格化方法及精度评估标准. 这两颗卫星为同系列卫星，各自搭载了一台由中国科学院空间中心空间环境探测研究室研制的高能粒子探测器，两台探测器的工作原理、制造工艺和技术指标完全相同. 该探测器可以对 6 个能道的高能质子通量和 1 个能道的高能电子通量同时进行观测. 选定的观测数据为 2010 年 8 月 29 日至 10 月 10 日期间能量范围为 3～5 MeV 的质子通量，该时间段内空间环境始终保持宁静，得到的观测数据中不包含突发性空间环境扰动引起的质子通量变化.

数据处理的具体步骤如下：

1）利用其中一颗卫星的数据，选取一种插值方法，给定该方法所需的各项参数值，得到卫星所处空间球面上的网格点通量，网格划分以经度、纬度为单位，每 1°作为一个网格.

2）使用网格点通量反演另一颗卫星各观测位置的通量，反演采用趋势面插值法，即在网格点中选取 3 个点，此 3 个点形成的三角形是可以包围采样位置的最小三角形，将网格点的经度、纬度作为 x、y 坐标，通量作为 z 坐标，拟合出一个趋势面方程，利用该方程计算出观测位置的通量.

3）将反演值与观测值进行比对，得到所选定插值方法在采用选定参数时的误差分析结果.

在第 3.2 节给出的各种插值方法中，反距离加权法、自然邻点法、最近邻点法、克里格法和径向基函数法支持球面插值，克里格法和径向基函数法在使用中需要较多的人工干预才能得到精度较高的结果，不适于工程应用. 因此，在实际建模中本文选择了反距离加权法、自然邻点法和最近邻点法进行对比. 表 2 给出了这 3 种插值方法处理结果的误差分析对比，改变反距离加权法的输入参数会得到不同的处理结果，表 2 给出的是其误差分析最优的结果. 从表 2 给出的结果可以看出，反距离加权法在最优状态下得到的处理结果的精度高于自然邻点法和最近邻点法，原因在于其输入参数优化处理能够大幅减小系统偏差（$\mathrm{RMSE_s}$）中的缩放成分（$\mathrm{RMSE_p}$），自然邻点法和最近邻点法没有可调整的输入参数，反距离加权法有两个输入参数可以调整，其计算原理为

表 2　采用反距离加权法、自然邻点法和最近邻点法处理结果的误差分析对比

Table 2　Error analysis comparison of processing results of IDW, natural neighbor and nearest neighbor

方法	a	b	RMSE/(cm^{-2}·sr^{-1}·s^{-1})	$\mathrm{RMSE_u}$/(cm^{-2}·sr^{-1}·s^{-1})	$\mathrm{RMSE_s}$/(cm^{-2}·sr^{-1}·s^{-1})
自然邻点法	−0.69511	1.25167	71.68575	46.59882	54.47382
最近邻点法	−0.48722	1.25192	73.88811	49.80222	54.58197
反距离加权法	−2.19672	1.01709	48.64780	48.48342	3.99568

方法	$\mathrm{RMSE_a}$/(cm^{-2}·sr^{-1}·s^{-1})	$\mathrm{RMSE_p}$/(cm^{-2}·sr^{-1}·s^{-1})	$\mathrm{RMSE_i}$/(cm^{-2}·sr^{-1}·s^{-1})	$\mathrm{MSE_u}$/MSE	$\mathrm{MSE_s}$/MSE
自然邻点法	0.69511	54.58076	−3.48511	0.42256	0.57744
最近邻点法	0.48722	54.65784	−2.91982	0.45431	0.54569
反距离加权法	2.19672	3.70774	−1.61477	0.99325	0.00675

方法	$\mathrm{MSE_a}$/MSE	$\mathrm{MSE_p}$/MSE	$\mathrm{MSE_i}$/MSE	d
自然邻点法	0.00009	0.57971	−0.00236	0.97811
最近邻点法	0.00004	0.54721	−0.00156	0.97678
反距离加权法	0.00204	0.00581	−0.00110	0.98748

$$\hat{v}=\frac{\sum_{i=1}^{n} v_i/d_i^p}{\sum_{i=1}^{n} 1/d_i^p} \tag{10}$$

式中：$\hat{v}$ 为待插值点的属性值，即网格点通量；v_i 为参与插值的离散点属性，即观测位置的通量；d_i 为观测位置和网格点的距离，因此，可以通过调整距离的阶数 p 和观测数据的范围 n 获得不同的插值结果，而在实际应用中一般是通过改变搜索半径 r 来控制参与插值的观测数据的范围.

在计算中，将 r 的范围确定为 1～22 013.14 km，其中 1 km 为观测点至网格点距离的最小值，22 013.14 km为卫星轨道球面上大圆的半周长. 在此范围下，本文获得了 p 从 1～10 的处理结果. 图4和图5所示分别为不同 p 取值下的 d 和 RMSE 的对比. 从图4可以看出，当 $r<1\,000$ km 时，不同 p 取值下的结果基本相同；当 $r>1\,000$ km 时，在$p=1$ 和 $p=2$ 的情况下 d 会随着 r 的增加迅速减小，在 $p\geqslant 3$ 的情况下 d 基本保持不变，仍然维持较高水平. 图5所示的 RMSE 的变化规律与 d 类似，在 $p=1$、2 和 3 的情况下最小 RMSE 值均小于 $p\geqslant 4$，但获得最小 RMSE 的 r 各不相同. 图4和图5的结果说明，在 $p\geqslant 4$ 的情况下，当 $r>65$ km时，不同 p 值下 d 和 RMSE 的变化规律几乎完全相同，说明此种情况下单纯增大 r 不能影响插值结果的精度，这是由反距离加权法的原理决定的. 从式(10)中可知，p 增大会增加距离网格点较近的实测点在插值结果中的权重. 因此，当 r 取值使得搜索范围包含全部对插值结果有主要作用的实测点后，增大 r 基本不会改变插值结果的精度.

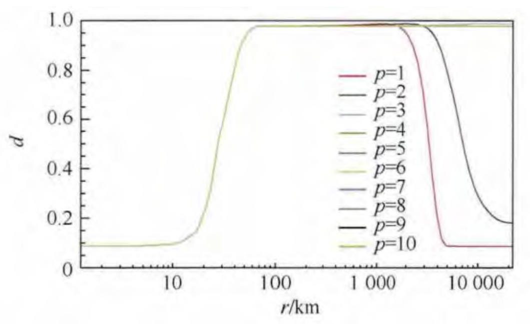


图4 反距离加权法取不同 p 时处理结果的 d 对比

Fig. 4 Comparison of processing results of d with different p in IDW

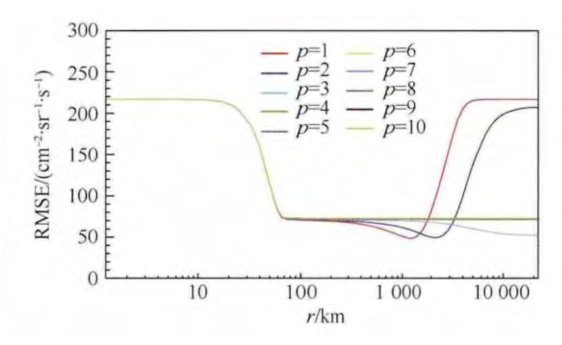


图5 反距离加权法取不同 p 时处理结果的 RMSE 对比

Fig. 5 Comparison of processing results of RMSE with different p in IDW

图6给出了反演结果和观测结果的对比，反演结果采用反距离加权法处理获得，p 从 1 取到 10，选定的 r 使当前 p 下反演结果的 RMSE 最小.

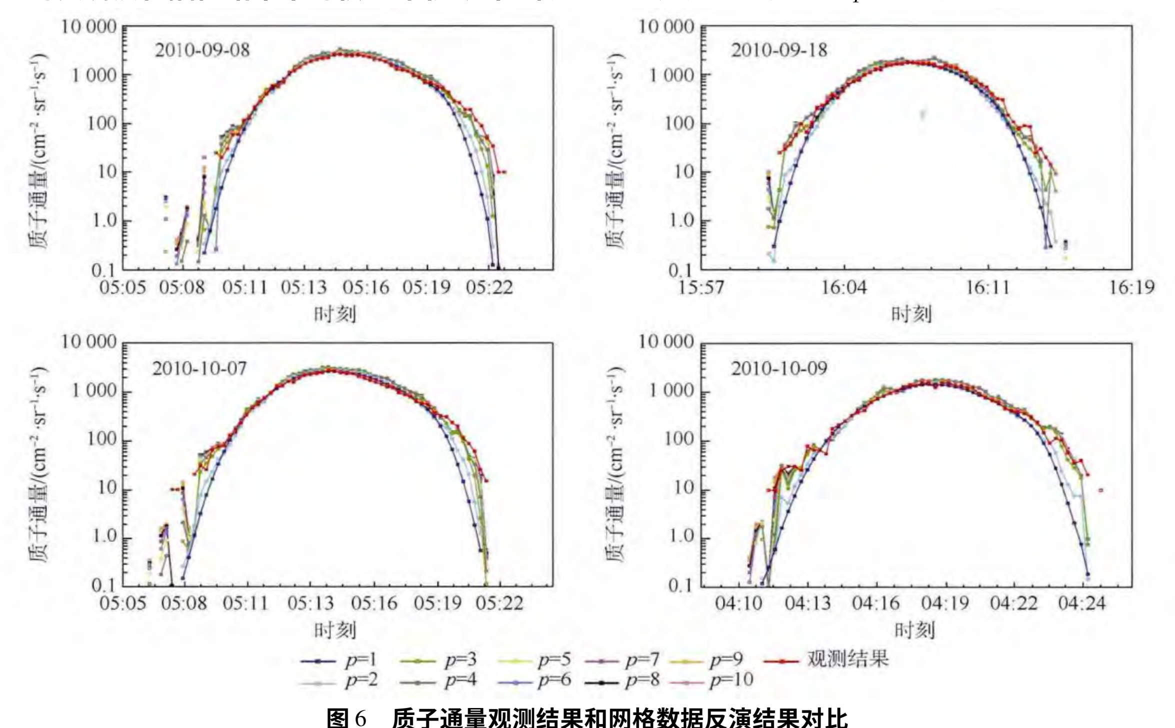


图6 质子通量观测结果和网格数据反演结果对比

Fig. 6 Proton flux comparison of observation and inversion result by data grid

从图 6 可以发现观测结果具有以下缺陷：

1）本底较高，基本维持在大于 10/(cm^2·sr·s) 的水平，这是由探测器几何因子较小决定的.

2）通量范围在 10～100/(cm^2·sr·s) 的区间内，观测结果抖动比较严重，这是受仪器本底噪声和观测数据采用遥测分层值方式采集的共同影响造成的.

理想的网格数据给出的反演结果，应该可以对观测数据中出现的以上缺陷予以修正. 对比图 6给出的各阶反演结果，可以发现它们具有以下特点：

1）通量大于 100/(cm^2·sr·s) 时，各阶反演结果与观测结果一致性均较高.

2）通量小于 100/(cm^2·sr·s) 时，低阶(p = 1，p = 2) 反演结果具有较好的消除抖动的效果，对于本底以下的通量具有较好的外推效果.

因此，使用反距离加权法进行处理，当距离阶数 p 选定为 1 或 2 时，得到的反演结果合理程度更高; 同时，根据图 4 和图 5 给出的误差分析结果，选择合适的搜索半径 r，可以使反演结果精度最高.

4 结 论

本文说明了自主辐射带模型属于动态模型的原因，指出了自主模型相比于 AP8/AE8 的改进之处，即可以给出各种辐射带周期性变化和扰动变化; 讨论了辐射带自主建模的目标和思路，针对 LEO 空间数据网格化问题，根据目前我国自主探测数据的实际情况，使用了空间分层的方式对每一个卫星所处空间球面上的数据分别进行处理; 在生成数据网格的插值计算中，根据各常用插值方法的特点，选择反距离加权法、自然邻点法和最近邻点法作为考察的插值方法，通过对网格数据反演结果的误差分析和与观测结果的比对，确定反距离加权法具有更高的精度，且反距离加权法在采用低阶距离的情况下生成的数据网格得到的反演结果具有更高的合理性，并可以对实测数据中的一些缺陷进行弥补.

本文讨论的 LEO 空间数据网格化方法的评价标准建立在误差分析的基础上，是一种数值分析的方法. 实际上，辐射带的形成有着复杂的物理机制，其内部高能带电粒子的分布也服从相应的物理规律，因此辐射带建模不能脱离物理理论的指导. 在后续工作中需要重点改进的地方是将物理理论与数值分析方法相结合，利用物理理论对数值分析方法进行完善.

参考文献(References)

[1] Bothmer V，Daglis I A. Space weather: Physics and effects [M]. New York: Springer，2007: 154-159.

[2] 徐文耀. 地球电磁现象物理学 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社，2009: 388-389.
Xu W Y. Physics of electromagnetic phenomena of the earth [M]. Heifei: University of Science and Technology of China Press，2009: 388-389(in Chinese).

[3] 沈自才. 空间辐射环境工程 [M]. 北京: 中国宇航出版社，2013: 4-29.
Shen Z C. Space radiation environmental engineering [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House，2013: 4-29(in Chinese).

[4] 姜景山，王文魁，都亨，等. 空间科学与应用 [M]. 北京: 科学出版社，2000: 649-652.
Jiang J S，Wang W K，Du H，et al. Space science and applications [M]. Beijing: Science Press，2000: 649-652(in Chinese).

[5] 褚桂柏. 空间飞行器设计 [M]. 北京: 航空工业出版社，1996: 49-54.
Chu G B. Space vehicle design [M]. Beijing: Aviation Industry Press，1996: 49-54(in Chinese).

[6] Ginet G P，O'Brien T P. Trapped radiation and plasma models requirements specification，AE-9/AP-9 [R]. Washington，D. C.: NASA，2009.

[7] Vette J I. The AE-8 trapped electron model environment，NASA STI/Recon Technical Report N，1991，92: 24228 [R]. Washington，D. C.: NSSDC/WDC-A-R&S，1991.

[8] Sawyer D M，Vette J I. AP-8 trapped proton environment for solar maximum and solar minimum，NASA STI/Recon Technical Report N，1976，77: 18983 [R]. Washington，D. C.: NSSDC/WDC-A-R&S，1976.

[9] 王世金，叶宗海. 实践四号卫星高能质子重离子探测器探测数据初步分析 [J]. 航天器工程，1995，4(3): 1-7.
Wang S J，Ye Z H. Initial data analysis from the energetic proton and heavy ion detector on-board SJ-4 satellite [J]. Spacecraft Engineering，1995，4(3): 1-7(in Chinese).

[10] 师立勤，王世金，叶宗海，等. 实践五号高能粒子环境探测结果 [C]//实践五号卫星空间探测与试验成果学术会议论文集. 北京: 中国空间科学学会空间探测专业委员会，2002: 51-61.
Shi L Q，Wang S J，Ye Z H. et al. Energetic particle environment detection results by SJ-5 satellite [C]//Symposium of the Scholar Meeting on Space Exploration and Test Results by SJ-5 Satellite. Beijing: Space Exploration Committee of Chinese Society of Space Research，2002: 51-61(in Chinese).

[11] 王世金，朱光武，梁金宝，等. FY-1C 卫星空间粒子成分监测器及其探测结果 [J]. 上海航天，2001，18(2): 24-28.
Wang S J，Zhu G W，Liang J B，et al. FY-1C space particle composition monitor and the results detected [J]. Aerospace Shanghai，2001，18(2): 24-28(in Chinese).

[12] Leonov A，Cyamukungu M，Cabrera J，et al. Pitch angle distribution of trapped energetic protons and helium isotope nuclei measured along the Resurs-01 No. 4 LEO satellite [J]. Annales Geophysicae，2005，23(9): 2983-2987.

[13] 王鹏,徐青,李建胜,等. 空间环境建模与可视化仿真技术[M]. 北京: 国防工业出版社,2012: 92-95.
Wang P,Xu Q,Li J S,et al. Space environment modeling and visual simulation techniques [M]. Beijing: National Defence Industry Press,2012: 92-95(in Chinese) .

[14] 王世金,朱光武,梁金宝. 我国空间环境天基监测网建设[C] // 中国空间科学学会空间探测专业委员会第十六次学术会议论文集(上) . 北京: 中国空间科学学会空间探测专业委员会,2003: 65-68.
Wang S J,Zhu G W,Liang J B. Space-based space weather monitoring network building in China [C] // Symposium of the 16th Scholar Meeting Held by Space Exploration Committee of Space Science Society in China(I) . Beijing: Space Exploration Committee Chinese Society of Space Research,2003: 65-68(in Chinese) .

[15] Friedel R H W,Bourdarie S,Cayton T E. Intercalibration of magnetospheric energetic electron data [J]. Space Weather,2005,3(9) : 2561-2570.

[16] 庄洪春. 宇航空间环境手册 [M]. 北京: 中国科学技术出版社,2000: 140-148.
Zhuang H C. Aerospace environmental handbook [M]. Beijing: China Science and Technology Press,2000: 140-148(in Chinese) .

[17] O'Brien T P. A framework for next-generation radiation belt models [J]. Space Weather,2005,3(7) : 1891-1904.

[18] Serón F J,Badal J I,Sabadell F J. Spatial prediction procedures for regionalization and 3-D imaging of Earth structures [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors,2001,123(2) : 149-168.

[19] Isaaks E H,Srivastava R M. Applied geostatistics [M]. New York: Oxford University Press,1989: 279-322.

[20] Watson D F. Contouring: A guide to the analysis and display of spatial data [J]. Computer Methods in the Geosciences,1993,19(10) : 1571-1572.

[21] Aurenhammer F. Voronoi diagrams: A survey of a fundamental geometric data structure [J]. ACM Computing Surveys (CSUR) ,1991,23(3) : 345-405.

[22] PIZOR P J. Principles of geographical information systems for land resources assessment [J]. Soil Science,1987,144(4) : 306.

[23] Barrodale I,Skea D,Berkley M,et al. Warping digital images using thin plate splines [J]. Pattern Recognition,1993,26(2) : 375-376.

[24] Powell M J D. Tabulation of thin plate splines on a very fine two-dimensional grid,DAMTP 1992/NA2 [R]. Cambridge: University of Cambridge,1992.

[25] Akima H. Algorithm 761: Scattered-data surface fitting that has the accuracy of a cubic polynomial [J]. ACM Transactions on Mathematical Software(TOMS) ,1996,22(3) : 362-371.

[26] Renka R J,Cline A K. A triangle-based C^1 interpolation method [J]. Rocky Mountain Journal,1984,14(1) : 223-238.

[27] Franke R,Nielson G. Smooth interpolation of large sets of scattered data [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering,1980,15(11) : 1691-1704.

[28] Renka R J. Algorithm 790: CSHEP2D: Cubic shepard method for bivariate interpolation of scattered data [J]. ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS) ,1999,25(1) : 70-73.

[29] Shepard D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data [C] // Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference. New York: ACM,1968: 517-524.

[30] Franke R. A critical comparison of some methods for interpolation of scattered data,NPS-53-79-003 [R]. Monterey,CA: Naval Postgraduate School,1979.

[31] Hardy R L. Theory and applications of the multiquadric-biharmonic method 20 years of discovery 1968-1988 [J]. Computers & Mathematics with Applications,1990,19(8-9) : 163-208.

[32] Peucker T K,Fowler R J,Little J J,et al. The triangulated irregular network [C] // International Symposium on Cartography and Computing: Applications in Health and Environment. Gaithersburg,Maryland: AmericanCongress on Surveying and Mapping,1978: 516-532.

[33] Krajewski S A,Gibbs B L. Understanding contouring: A practical guide to spatial estimation and contouring using a computer and basics of using variograms [M]. Boulder,CO: Gibbs Associates,2001: 20-25.

[34] Lee D T,Schachter B J. Two algorithms for constructing a Delaunay triangulation [J]. International Journal of Computer & Information Sciences,1980,9(3) : 219-242.

[35] 侯景儒,尹镇南,李维明,等. 实用地质统计学 [M]. 北京: 地质出版社,1998: 45-50.
Hou J R,Yin Z N,Li W M,et al. Practical geology statistics [M]. Beijing: Geological Publishing House,1998: 45-50(in Chinese) .

[36] 张维娜,吕云霄,吴美平. 改进谢别德插值方法在地磁图构建中的应用 [J]. 导航与控制,2011,10(1) : 28-32.
Zhang W N,Lv Y X,Wu M P. Application of modified shepard interpolation in geomagnetic map [J]. Navigation and Control,2011,10(1) : 28-32(in Chinese) .

[37] 魏义坤,杨威,刘静. 关于径向基函数插值方法及其应用 [J]. 沈阳大学学报,2008,20(1) : 7-9.
Wei Y K,Yang W,Liu J. Interpolation method of radial basis function and its application [J]. Journal of Shenyang University,2008,20(1) : 7-9(in Chinese) .

[38] 涂传诒. 日地空间物理学: 行星际与磁层. 下册 [M]. 北京: 科学出版社,1988: 118-127.
Tu C Y. Sun-earth space physics: Interplanetary and magnetosphere (II) [M]. Beijing: Science Press,1988: 118-127(in Chinese) .

[39] Willmott C J. On the validation of models [J]. Physical Geography,1981,2(2) : 184-194.

Modeling technology of radiation belt in LEO based on data gridding methods

CHANG Zheng[1,2], WANG Yongmei*[1], TIAN Tian[3], ZHANG Xianguo[1]

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. College of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Unit 61741, Beijing 100094, China)

Abstract: The energetic charged particle in the radiation belts of earth is the main environmental factor which can result in performance degradation and even failure of the material and device on spacecraft, so the accuracy of radiation belts model which is being used during design phase of spacecraft is very important to spacecraft performance of space mission and survivability. In the development of radiation belts model based on our own country's data from exploration of radiation belts, the gridding of discrete data is a fundamental task. The key facts of data from Chinese exploration of radiation belts were introduced, the goal and road-map of modeling were described, the application of interpolation in gridding of modeling of radiation belts in low-earth orbit (LEO) was discussed, and the significant errors were analysed. The result of interpolation indicates that in mainly interpolation methods, inverse distance weighting (IDW), natural neighbor and nearest neighbor are most suitable for engineering calculation, the particle flux which is inverted from data grid produced by IDW has the highest precision, and the result from IDW will be more accurate when IDW uses small exponent of distance.

Key words: space environment; radiation belts; data grid; interpolation; inverse distance weighting; natural neighbor; nearest neighbor